

УДК 621.0

ПОИСК НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.В. Козляков, Д.Л. Раков



**КОЗЛЯКОВ
Вячеслав
Васильевич**

Доктор технических наук, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, заслуженный инженер России, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, профессор кафедры «Автомобили и двигатели» МГИУ. Член Комиссии РАН по использованию энергоаккумуляторных веществ в машиностроении, механике и экологии. Специалист в области тепловых двигателей, водородных технологий в энергетике и на транспорте, системного анализа в технике. Автор более 200 научных трудов, в том числе 4 монографий и 18 изобретений.

Введение

Современный этап развития науки и техники характеризуется усложнением создаваемых технических средств, резким увеличением стоимости их разработки, производства, эксплуатации, а также быстрым моральным старением и снижением возможности одновременного существования нескольких изделий близкого назначения. В связи с этим особое значение приобретает создание техники, воплоща-

ющей передовые достижения науки [1]. Огромное число факторов, касающихся процессов конструирования, технологии, эксплуатации и экономики, влияющих на процесс создания новой техники, предопределили необходимость использования системного анализа и синтеза при проектировании технических систем (ТС) в машиностроении. Однако большие надежды, возлагаемые на использование в процессе проектирования вычислительных средств, оправдываются далеко не в полной мере. Сложившаяся ситуация описывается в работе [2], где указывается на недоработанность общей теории проектирования, что заставляет внимательно рассмотреть особенности и содержание процесса проектирования.



**РАКОВ
Дмитрий
Леонидович**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, член Комиссии РАН по использованию энергоаккумуляторных веществ в машиностроении, механике и экологии, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Специалист в области структурного анализа, синтеза и конструирования технических систем. Автор более 130 научных трудов.

© В.В. Козляков, Д.Л. Раков, 2008

Основные задачи проектирования

В практическом плане проектирование каждого устройства (системы, технологического процесса) следует рассматривать как совокупность двух основных задач: выбора структуры, или структурного синтеза, и выбора числовых значений параметров элементов данной структуры, или синтеза параметров, решаемых на любом этапе его создания [3].

Методы решения этих задач и их сложность существенно различаются. Задачи параметрического синтеза, как правило, сводятся к поиску решений, удовлетворяющих метрическим критериям, что делает их формально разрешимыми. Совершенно иной является задача структурного синтеза, результатом которого является выбор рациональной структуры объекта. Синтез структуры с различной степенью детализации может быть осуществлен на различных этапах процесса проектирования. Однако, наибольший эффект может быть получен на ранней стадии – этапе технического предложения, характерной особенностью которого является ограниченность информации о свойствах будущей системы.

На рис. 1 представлена качественная картина, показывающая, как по мере увязки и детальной проработки проекта от задач проектного поиска 1 и этапа эскизного проектирования 2 к периоду рабочего проектирования 3, изготовления 4 и отработки 5 увеличиваются затраты и уменьшается возможность коррективы первоначальных технических решений (ТР) [4].

Приведенная зависимость подтверждает важность обстоятельного и детального начального поиска, поглощающего около 4% общей стоимости проекта. Здесь же показана и тенденция накопления сведений о проекте по мере его все более детальной разработки.

В большинстве практических задач структурный синтез образует с параметрическим синтезом единое целое. Очевидно, что параметрический синтез (оптимизация) проводится при условии фиксированной структуры объекта. Структурный синтез слабо связан с

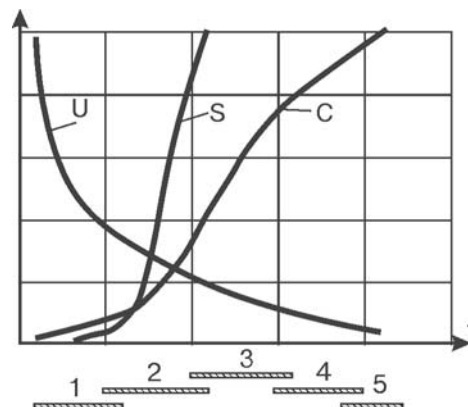


Рис. 1. Зависимости стоимости проекта и возможности коррекции решений от времени разработки проекта:

U – возможность коррекции решений;
 S – тенденция накопления информации;
 C – стоимость проекта; t – время разработки проекта; 1 – проектный поиск; 2 – эскизное проектирование; 3 – рабочее проектирование; 4 – изготовление; 5 – отработка

какими-либо предположениями о величинах выбранных параметров. Поэтому параметрическая оптимизация, естественная для любого процесса проектирования, всегда опирается на структурный синтез.

Целесообразность разработки методов структурного синтеза не вызывает сомнений, поскольку в дополнение к эффекту, получаемому от решения задач параметрической оптимизации, может быть получен не меньший эффект за счет расширения (на порядок и более) вариантов рассматриваемых ТР. Чем больше вариантов анализируется, тем качественнее исследование и больше уверенность в достижении поставленной цели. По этой причине выбор и рассмотрение альтернативных вариантов – одна из важнейших задач процесса проектирования. Вместе с тем, очевидно, что чем больше вариантов возможных ТР, тем выше трудоемкость проектных работ.

Одной из важных проблем при поиске новых ТР остается задача формализации поиска. Так, В.М. Одрин [5] все множество методов постановки и решения задач структурного синтеза делит на два класса: трансформационные и морфологические. Трансформационный подход опирается на широкое использование творческих возможностей человека. Однако для

деятельности человека характерно определенное пристрастие к регулярным подходам, представленным упорядоченными, хорошо просматриваемыми и понятными для него действиями, в то время как оригинальные пути решения обычно не относят к «регулярным». Морфологические методы базируются на комбинаторном подходе. Процедура морфологического анализа позволяет целенаправленно и планомерно закладывать в морфологические множества технических решений огромное число аналогов ТР.

Морфологические методы структурного синтеза

Морфологический подход может быть эффективно использован для структурного синтеза. Он заключается в построении морфологической таблицы, заполнении ее возможными альтернативными вариантами и выборе из всего множества комбинаций наилучших решений.

Специальная процедура систематического комбинирования понятий (терминов) была введена Р. Луллием (1234–1315). Сконструированная им «логическая машина» позволяла путем комбинирования исходных понятий получать более сложные понятия и суждения [6]. Немецкий математик Готтфрид Вильгельм Лейбниц был, по-видимому, первым, кто использовал термин «комбинаторика» в современном его понимании. Датой рождения современного морфологического подхода можно считать 1942 год – дату выхода в свет первой работы швейцарского астрофизика Ф. Цвикки по морфологическому анализу реактивных двигателей с описанием его метода «морфологического ящика», который получил дальнейшее развитие в трудах Ф. Цвикки и в ряде других исследований [7–9].

Недостатком метода является невозможность перебора и анализа всех возможных вариантов, так как мощность морфологического множества может быть колоссальной (достигать десятков и сотен тысяч возможных альтернатив).

Методика структурного синтеза новых технических решений в машиностроении

Для устранения этого недостатка авторами была разработана оригинальная методика поиска новых технических решений и выбора рациональной структуры на ранних стадиях проектирования, в соответствии с которой процесс структурного синтеза предусматривает этапы, изображенные на рис. 2.

Методика основана на положениях системного и кластерного анализа, и включает математическое и компьютерное моделирование. В целом процедура состоит из четырех основных этапов:

1. Создание морфологической таблицы.

Для исследуемого объекта выделяют группу основных признаков. В зависимости от вида задачи из множества признаков выбираются наиболее существенные. Выбор является неформальным моментом. Так, множество признаков можно выявить из формул изобретений. Для каждого признака выбирают элементы, т.е. возможные варианты его исполнения или реализации, комбинируя которые, можно получить множество различных решений (вариантов).

Основные сложности на пути выбора решения определяются двумя обстоятельствами: сложностью формализации задачи и большим количеством разнообразных требований, критериев и ограничений. В дальнейшем производится сопоставление каждому элементу морфологической таблицы соответствующего значения критерия, по которому будет проводиться оценка. В зависимости от поставленной цели критериям присваиваются весовые коэффициенты.

2. Формирование вариантов.

На этом этапе осуществляется генерация вариантов, их оценка, первоначальный отбор, в результате чего формируется некоторое множество рациональных вариантов для последующего анализа. Каждый новый сгенерированный вариант сравнивается с предыдущими вариантами [10].

3. Кластеризация вариантов.

Проводится кластеризация вариантов с ис-

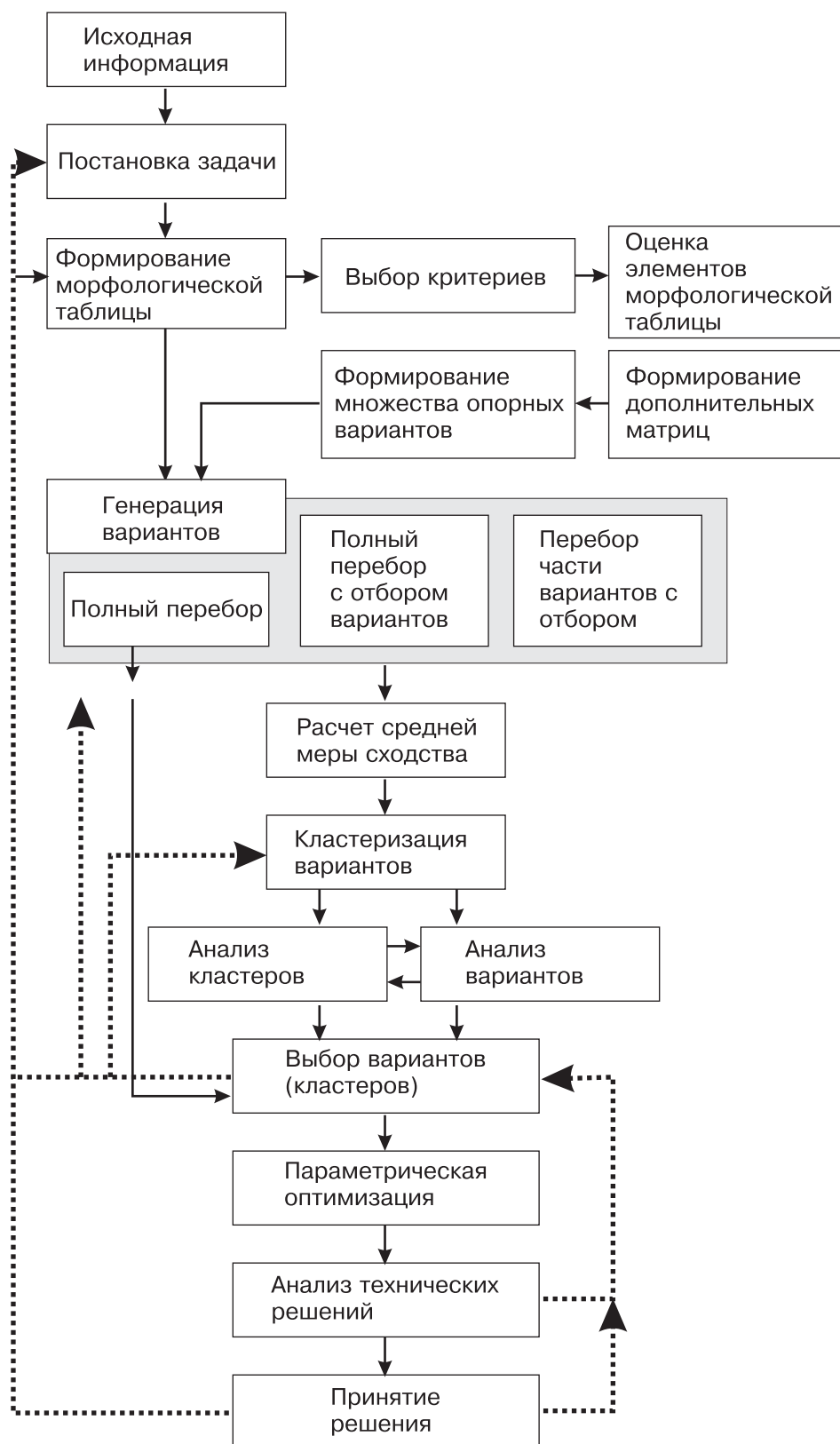


Рис. 2. Блок-схема структурного синтеза на этапе предэскизного проектирования

пользованием введенной меры сходства. Процесс кластеризации рассматривается как поиск «естественной» группировки объектов. Проекти-

ровщик может выбрать необходимую степень разбиения исходного множества на кластеры.

Область исследования сужают к несколь-

ким кластерам, которые в дальнейшем исследуются. Сопоставляя варианты, определяют наилучшие решения, успех которых наиболее вероятен. Вводится степень новизны и оценка найденных альтернатив. Для повышения степени информативности при выборе генерируются конвергентные варианты, т.е. имеющие максимальную оценку по каждому из критериев и «лучший» или «идеальный» вариант, т.е. ТР имеющее максимальную оценку.

4. Параметрическая оптимизация.

После выбора некоторого количества вариантов производят параметрическую оптимизацию и окончательный выбор ТР.

В настоящее время в области машиностроения происходит быстрое моральное старение технических решений, что предполагает их частую смену. Предлагаемый авторами подход позволит не только повысить технический уровень разрабатываемых технических систем, но и сократить время их проектирования.

Разработанная методика была применена для анализа новых технических решений в области использования энергоаккумулирующих веществ и для разработки перспективных двигательных установок.

Использование энергоаккумулирующих веществ для проектирования стратосферных платформ

В настоящее время существует ряд концепций стратосферных платформ, базирующихся на аэростатах (высоты полета 19–22 км) и стра-

тосферных летательных аппаратах (высоты полета 16–21 км) [11].

Можно указать основные области применения стратосферных платформ:

- коммуникация;
- наблюдательные пункты (для пограничной и милицейской службы);
- в военных целях;
- исследовательская область (мониторинг атмосферы, изучение ветров, загрязнения окружающей среды, состояние озонового слоя и т.п.).

При поиске новых технических решений перед конструкторами стоит задача нахождения оптимального сочетания различных элементов. Так, конфигурация, состав и программа функционирования аппаратов, соответствующих одним и тем же требованиям, могут существенно отличаться друг от друга. Была проведена процедура синтеза перспективных ТР и их кластеризация при помощи расстояния Хемминга.

Одной из основных проблем при проектировании стратосферных платформ является выбор энергоаккумулирующих систем, обеспечивающих долговременное крейсерование аппаратов в стратосфере. В результате была предложена следующая схема энергообеспечения платформ (рис. 3) [12].

Днем солнечные батареи напрямую питают двигательную установку и аппаратуру, а часть энергии идет на расщепление воды (на борту аэростата расположен бак с водой) в

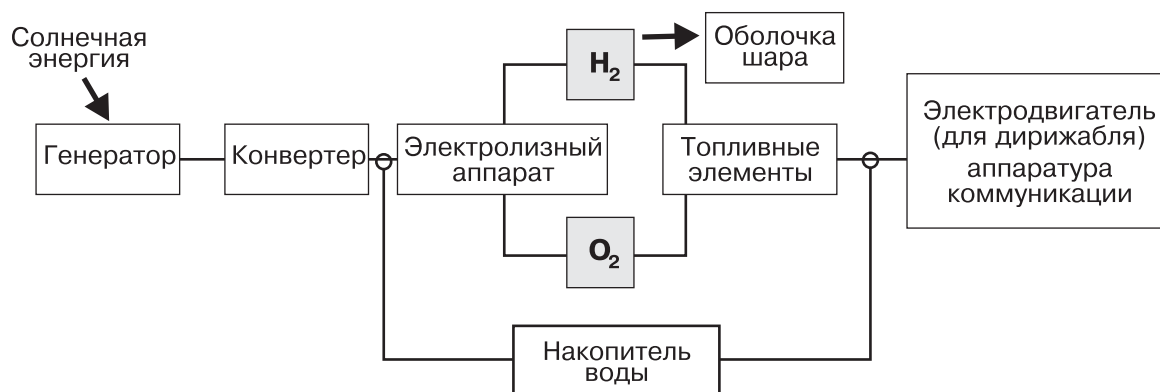


Рис. 3. Использование энергоаккумулирующих веществ на борту аэростата при помощи преобразования солнечной энергии

электролизере на водород и кислород. Ночью запасенные водород и кислород превращаются в топливных ячейках в воду с образованием электрической энергии, а образовавшаяся вода запасается в емкости. На следующие сутки процесс повторяется. Другой возможностью энергообеспечения беспилотных летательных аппаратов или свободных аэростатов является использование СВЧ-излучения, передаваемого на борт аппарата с Земли. Были проведены испытания этой технологии с передачей мощности, равной 30 кВт, на большое расстояние с эффективностью 54%. Недостатками такой технологии является необходимость создания зон отчуждения и негативное влияние на окружающую среду. Результаты решения этой задачи с помощью экспертных методов защищены патентами.

Анализ перспективных двигательных установок

С целью поиска перспективных двигательных установок (ДУ) для летательных аппаратов больших сверхзвуковых скоростей полета был разработан метод идентификации установок по известным техническим решениям. Сложность задачи заключалась в том, что известно большое число ТР: от двигателей, обеспечивающих весьма высокую экономичность при умеренной взлетной тяге и низкой удельной массе в ши-

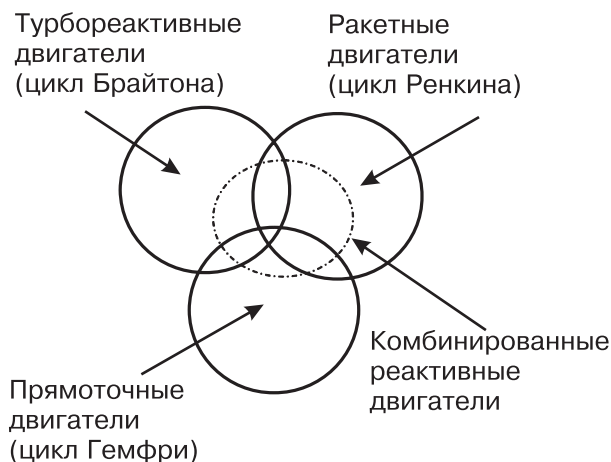


Рис. 4. Двигательные установки для летательных аппаратов больших сверхзвуковых скоростей полета

роком диапазоне режимов работы по скорости полета, до двигателей, обладающих возможностью почти неограниченного форсирования тяги в условиях взлета и даже маршевого полета [13]. Возможные варианты двигательных установок для летательных аппаратов больших сверхзвуковых скоростей полета представлены на рис. 4.

Экспериментальная проверка всех многообещающих идей требует создания большого числа модельных установок и проведения соответствующих исследований. Применение экспертных методов при прогнозировании развития авиационной техники позволяет выбрать наиболее предпочтительные направления ис-

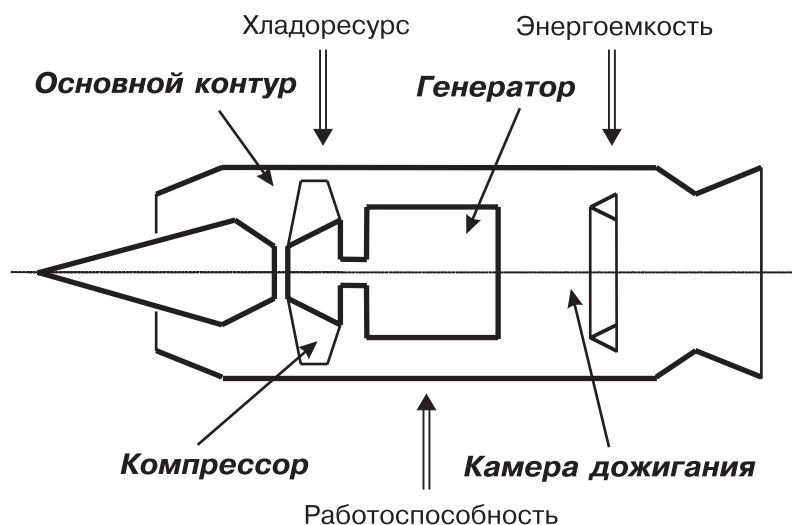


Рис. 5. Основные факторы повышения эффективности комбинированного реактивного двигателя

Основные принципы классификации водородных КРД

Классификационный признак	Альтернативное значение признака		
	1	2	3
1. Принцип преобразования энергии в газогенераторном цикле	Цикл Брайтона (газо-воздушный цикл)	Цикл Ренкина (паро-жидкостный цикл)	Комбинированный цикл
2. Принцип передачи энергии газогенераторного цикла основному	С отбором механической работы, но без отбора тепловой энергии	С отбором механической работы и тепловой энергии	С отбором тепловой энергии, но без отбора механической работы
3. Принцип присоединения массы газогенераторного цикла к основному	Без присоединения массы	С присоединением массы, без увеличения кинетической энергии	С присоединением массы и увеличением кинетической энергии
4. Принцип, использования свойств источника энергии газогенераторного цикла	Теплотворная способность	Теплотворная способность и работоспособность	Теплотворная способность, работоспособность и хладоресурс

следований [14]. Создание авиационных двигателей должно идти с опережением к началу работ над проектами новых летательных аппаратов.

Основной проблемой являлось выделение характерных признаков, определяющих объект. Двигатель рассматривался как системный технический объект, материальные элементы которого реализуют управляемый рабочий процесс для создания тяги. Рабочий процесс состоит из двух циклов – *генераторного* и *основного*. Генераторный цикл служит не только для получения полезной работы, но и для выработки энергии, передаваемой рабочему телу, участвующему в основном цикле. В основном цикле подведенная энергия превращается в полезную работу. Основные факторы повышения эффективности комбинированного реактивного двигателя (КРД) представлены на рис. 5.

Отсюда следует, что эффективность двигателя определяется способом и совершенством передачи энергии. Причем энергия генераторного цикла может быть передана ос-

новному в любой форме (в виде механической работы, тепла и пр.). Предлагаемое построение модели основано на четырех основных признаках, которые соответствуют принципам массо- и энергообмена между основным контуром и агрегатом мощности, а именно: преобразования энергии в генераторном цикле, передачи энергии генераторного цикла основному, присоединения массы генераторного цикла и использования основных свойств криогенного топлива. Основные принципы классификации водородных КРД представлены в таблице.

Анализ термодинамических закономерностей протекания рабочего процесса позволяет выявить степень влияния этих факторов на термодинамическую эффективность преобразования тепловой энергии в полезную работу продвижения и даже дать оценку массовым характеристикам отдельных элементов тепловой машины. Очевидно, что наибольшей эффективности эти факторы достигают, воздействуя на компрессор, генератор и камеру дожигания.

В современных реактивных двигателях осуществляется термодинамический цикл, приближающийся к идеальному циклу Брайтона. Поэтому совершенствование параметров рабочего процесса и характеристик ограничено предельными возможностями термодинамического цикла. Улучшение параметров рабочего процесса идет в направлении повышения температуры цикла и степени повышения в нем давления.

В настоящее время КПД элементов ДУ, в которых осуществляются термодинамические процессы сжатия воздуха, сгорания топлива и расширения продуктов сгорания, достигли предельно достижимых значений и дальнейшее их увеличение связано с возрастающими трудностями технической реализации и не оказывает существенного влияния на характеристики ДУ. Использование новых технологий для изготовления термически нагруженных элементов и методов активного охлаждения газовых турбин приближают температуру цикла к предельно достижимой температуре, а именно к стехиометрической. Отсюда следует, что дальнейшие возможности по улучшению характеристик ДУ при реализации цикла Брайтона весьма ограничены.

Из дальнейшего рассмотрения исключаем такой фактор, как энергоемкость и переходим к рассмотрению влияния двух оставшихся факторов, а именно хладоресурса и работоспособности криогенного топлива. Решающим фактором являются характерные для всех газовых циклов большие затраты механической работы на сжатие воздуха, которые составляют от 25 до 75% располагаемой работы цикла в зависимости от степени теплоподвода и степени повышения давления в цикле, которые определяются в рабочем диапазоне параметров. Как показано в работе [15], из-за большой величины относительной работы сжатия (отношения работы сжатия к работе цикла) даже при большой величине термического КПД невозможно обеспечить большую величину эффективного КПД. Постановка задачи исследования по улучшению эффективности КРД заключается в совершенствовании его термодинамического

цикла по сравнению с циклом Брайтона.

Один из возможных способов решения поставленной задачи состоит в изменении фазового состояния рабочего тела в процессе сжатия путем ожижения атмосферного воздуха и повышения его давления. Такой способ характеризуется переходом от адиабатического сжатия воздуха, характерного для идеального цикла Брайтона, к ракетному циклу с повышением давления рабочего тела в жидком состоянии, т.е. переходу к циклу Ренкина. Действительно, если предположить, что процесс сжатия осуществляется по промежуточному циклу между циклом Брайтона и ракетным циклом Ренкина, затраты на механическую работу сжатия будут меньше, а располагаемая степень повышения давления выше. Следовательно, по сравнению с затратами работы на сжатие воздуха в цикле Брайтона существует возможность значительного увеличения располагаемой работы цикла и повышения его термического КПД.

Рассмотренные выше признаки образуют открытую систему множества решений. Размытость границ между классами выражается описанием признаков лингвистическими переменными, введенными в теории нечетких множеств. Понятие «признак» разделен на три альтернативные части, две из которых являются пороговыми, а третья – составной. Например, по первому признаку процесс выделения энергии в генераторном цикле может осуществляться по циклам Брайтона, Ренкина или их комбинации. Принцип комбинирования признаков строения при синтезе двигателей выражен нечетким описанием альтернативных значений признаков. Такой подход позволяет рассматривать двигатель как объект, в котором внутренние процессы энергообмена определяют рабочий процесс и служат критерием различия двигателей. Множество ТР по комбинированным реактивным двигателям больших сверхзвуковых скоростей полета представлено на рис. 6.

На основании разработанного метода идентификации различных КРД на криогенном топливе создана экспертная система технических решений, включающая и программу на язы-

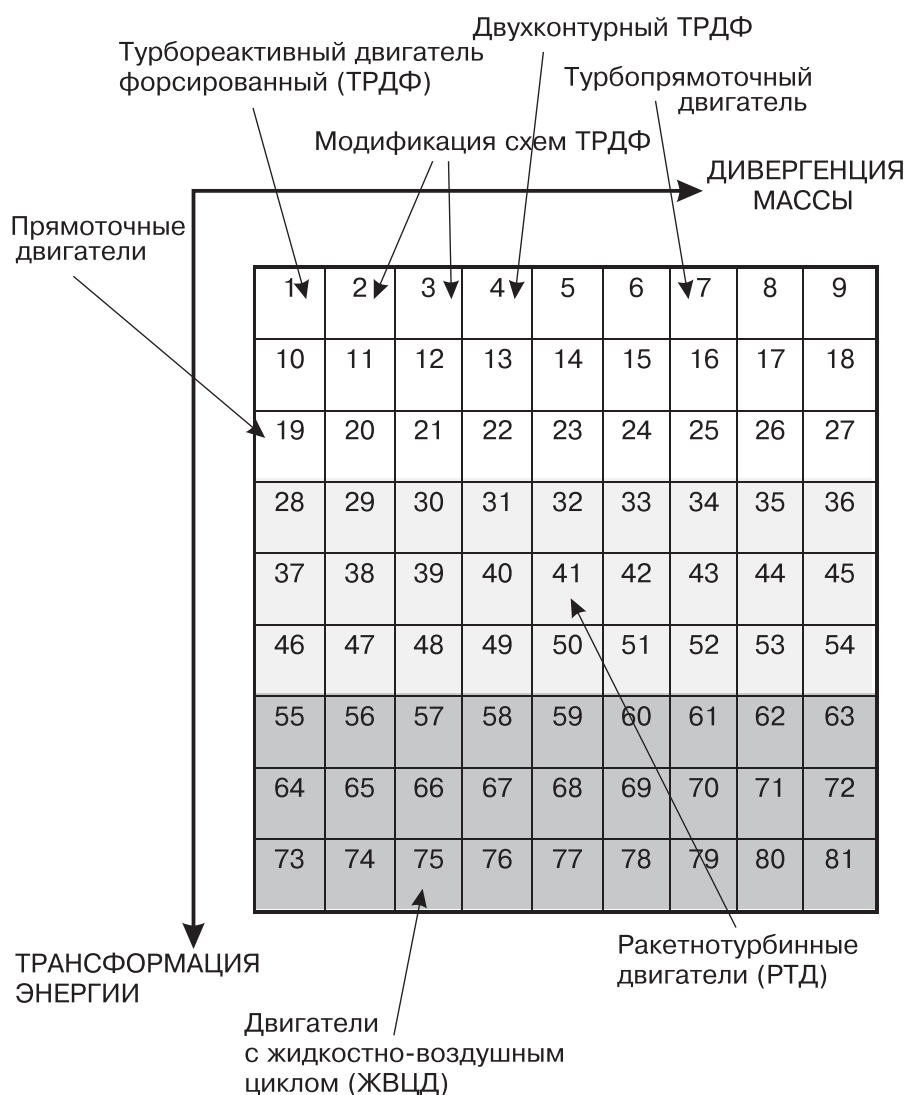


Рис. 6. Множество технических решений по комбинированным реактивным двигателям больших сверхзвуковых скоростей полета

ке высокого уровня для СУБД FoxPro-2, которая содержит банк данных по иностранным и отечественным патентам на устройство КРД [16]. Структура базы данных содержит поля, в которых отражаются необходимые для работы сведения, включая и индекс класса, к которому относится данное техническое решение устройства КРД. При создании структуры программы разработан максимально удобный, гибкий и эффективный пользовательский интерфейс с двухуровневым меню, состоящим из главного горизонтального меню (меню заголовков), расположенных в верхней части экрана, и нескольких вложенных в него вспомогательных меню. Это позволяет непосредственно управлять данными, вводить новые данные,

редактировать ранее введенные записи, а также настраивать рабочую среду системы.

Созданная экспертная система ТР позволяет не только систематизировать известные устройства КРД, но и является мощным средством в разработке новых решений [17]. Она дает разработчику возможность четко представить структуру ДУ и дать анализ технических решений его устройства с точки зрения организации рабочего процесса, а также сопоставить свое предложение с известными техническими решениями для отыскания совокупности отличительных признаков при оформлении патента. Результаты предложенной авторами статьи экспертной системы позволили одному из них (В.В. Козлякову) получить 6 авторских

свидетельств и один патент на новые варианты технических решений ракетных двигателей.

Заключение

Структурный синтез является мощным средством исследования в различных областях знаний. Разработанная процедура синтеза ТР является развитием известного морфологического метода и может быть применена для поиска новых ТР на ранних стадиях проектирования в машиностроении. Предложенная методика позволяет:

- решить задачу снижения размерности морфологических таблиц путем оценки и кластеризации вариантов и, следовательно, уменьшить трудозатраты при поиске новых ТР;
- эффективно генерировать морфологическое множество и при помощи меры сходства осуществлять кластеризацию и выбирать наилучшие альтернативы;
- сравнивать между собой альтернативные варианты ТР и кластеров.

При этом необходимо отметить, что недостатком предложенной методики по сравнению с классическим морфологическим анализом является рассмотрение не всех вариантов, а лишь некоторой их части, что, однако, восполняется эффективным процессом отбора перспективных альтернатив, способствующих облегчению труда конструкторов и проектировщиков.

Список литературы

1. Джонс Дж. К. Методы проектирования. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
2. Силин В.Б. Поиск структурных решений комбинаторными методами. – М.: МАИ, 1992. – 194 с.
3. Вермишев Ю.Х. Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем. – М.: Радио и связь, 1982. – 152 с.
4. Осин М.И. Методы автоматизированного проектирования летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1984. – 52 с.
5. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. – М.: ВНИИПИ, 1989. – 411 с.
6. Буш Г.Я. Стратегия эврилогии. – Рига: Знание, 1986. – 187 с.
7. Zwicky, F., Morphological Astronomy // The Observatory. Vol. 68. No. 845. Aug. 1948. P. 121–143.
8. Zwicky F. Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach. – New York: McMillan, 1969. – 276 p.
9. Левин М.Ш. Комбинаторное проектирование систем // Автоматизация проектирования. 1997. № 4. С. 14–19.
10. Rakov D. Morphological Synthesis Method of the Search for Promising Technical Systems // IEEE Aerospace and Electronic Systems magazine. December 1997. P. 3–8.
11. Tozer, T. C., Grace, D. High altitude platforms for wireless communications // Electron. Commun. Eng. J. June 2001. 13 (3). P. 127–137.
12. D. Rakov. Die universellen stratosphaerischen Plattformen (HAPs) // Deutsche Luft- und Raumfahrt Kongress. November 17–22, 2003, Munich, Germany, S. 476–482.
13. Козляков В.В., Комраков В.П., Самойлович М.В., Шихман Ю.М. Гиперзвуковые воздушно-реактивные двигатели, силовые установки, элементы и их системы // Обзор ЦИАМ. 1987. № 231. – 214 с.
14. Козляков В.В. Метод анализа иерархий в оценке эффективных показателей тепловых двигателей прямой реакции // Сб. «Системный анализ в технике». 2001. Вып. № 7. С. 40–53.
15. Курзинер Р.И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
16. Козляков В.В., Кравченко В.Ю. Экспертная система технических решений по комбинированным реактивным двигателям на базе СУБД FoxPro -2 // Сб. научных трудов МАИ, посвященный 50-летию кафедры 201. 1995. С. 54–58.
17. Kozlaykov V.V. System analysis of jet engines for great supersonic flight velocities // Journal of Flight Sciences and Space Research. 1996. No 23. P. 45 – 49.